



# **Etruria***natura*

*una finestra sul territorio*

Periodico dell'Accademia dei Fisiocritici, Siena

Anno XII - 2017/2018

Numero speciale sulle acque termali

*Coltivare conoscenza  
per creare coscienza*



ACCADEMIA DELLE SCIENZE DI SIENA DETTA DE' FISIOCRITICI



Etrurianatura  
Accademia dei Fisiocritici onlus  
piazzetta Silvio Gigli 2, 53100 Siena  
tel. 0577 47002  
www.fisiocritici.it  
www.museofisiocritici.it

#### Registrazione

Autorizzazione del Tribunale di Siena  
n. 747 del 19-1-2004

#### Direttore responsabile

Gianmichele Galassi

#### Responsabili scientifici

Roberto Fondi  
Roberto Mazzei

#### Comitato editoriale

Roberto Fondi  
Università di Siena  
Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e  
dell'Ambiente, via Laterina 8, 53100 Siena

Folco Giusti  
Università di Siena  
Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e  
dell'Ambiente, via Mattioli 4, 53100 Siena

Roberto Mazzei  
Università degli Studi di Siena  
Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e  
dell'Ambiente, via Laterina 8, 53100 Siena

Luana Paulesu  
Università di Siena  
Dipartimento di Scienze della Vita,  
via A. Moro 2, 53100 Siena

Claudia Perini  
Università di Siena,  
Dipartimento di Scienze della Vita,  
via Mattioli 4, 53100 Siena



Realizzazione editoriale  
Betti s.r.l.  
Siena (Italia)  
www.betti.it  
redazione@betti.it

Nessuna parte di questa rivista può essere  
riprodotta o trasmessa in qualsiasi forma o con  
qualsiasi mezzo elettronico, meccanico o altro  
senza l'autorizzazione scritta dei proprietari dei  
diritti e dell'editore. L'editore è a disposizione  
degli eventuali detentori di diritti che non sia stato  
possibile rintracciare

© 2018 Accademia dei Fisiocritici Onlus, Siena

ISSN 2282-2607

In copertina  
Foto di Giovanni Bencini – viale Europa,  
comparto “I Pini”, 42 - 58022 Follonica (GR)

Retro copertina  
Foto di Giovanni Bencini

# Sommario

## Presentazione

### Contributi

- 10 Geotermia nella Toscana meridionale: una risorsa importante da gestire con cura  
*Marcello Viti, Enrico Tavarnelli*
- 25 *Aqua et ignis*: scienza e senso del sacro delle acque termali per gli Antichi  
*Carmelo Cannarella, Valeria Piccioni*
- 39 Terapie termali nel trattamento delle malattie reumatiche: utopia o realtà?  
*Antonella Fioravanti, Sara Tenti, Sara Cheleschi, Mauro Galeazzi*
- 50 Gli habitat, la flora e la fauna degli ambienti termali della Toscana meridionale  
*Leonardo Favilli, Andrea Benocci, Claudia Angiolini, Giuseppe Manganeli*
- 56 La risorsa geotermica nella Toscana meridionale, con particolare riferimento alla bassa entalpia  
*Giacomo Biserni, Massimo Salloloni*
- 76 Le acque delle miniere nelle Colline Metallifere  
*Alessandro Masotti*
- 90 Le zone termali marine: un modello per studiare gli effetti dell'acidificazione degli oceani su popolazioni naturali  
*Ilaria Corsi, Elisa Bergami*

### La parola all'immagine

- 98 L'Uomo incontra l'armonia della Natura nelle colline senesi  
*Giovanni Bencini*

### Il punto della situazione

- 108 Le acque termominerali di Petriolo  
*Massimo Fanti, Massimo Salloloni*
- 121 «Heri mattina principassemo a tuore el bagno». Quando i Gonzaga venivano a Petriolo  
*Ricardo Bassani*
- 141 Il recupero dei Bagni di Petriolo
- 141 Bagni di Petriolo, un grande impegno di Italia Nostra  
*Mariarita Signorini*
- 142 Un esperimento di conservazione e valorizzazione  
*Adriano Paoletta*
- 146 Terme di pontefici e imperatori  
*Anna Guarducci, Andrea Arrighetti, Barbara Gelli*
- 147 Risultati e prospettive per la ricerca archeologica  
*Serena Massa, Susanna Bortolotto, Piero Favino, Andrea Garzulino*
- 149 Le varie fasi del recupero  
*Giovanni Minutoli, Stefano Bertocci*
- 151 Un progetto per ricreare l'armonia del luogo  
*Massimo Bettini*

### Schede naturalistiche

- 154 La Tomba etrusca delle foglie d'oro nei pressi dell'arca termale di Petriolo: tra Archeobotanica e Storia  
*Claudio Milanesi*

# La risorsa geotermica nella Toscana meridionale, con particolare riferimento alla bassa entalpia

Giacomo Biserni\*, Massimo Salleolini\*\*

\* Studio Ecogeo, Piazza del sale 10 - 58100 Grosseto (info@studioecogeo.com)

\*\* Università degli Studi di Siena, Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente, via Laterina 8 - 53100 Siena (massimo.salleolini@unisi.it)

«Di tutte le fonti di energia,  
il calore umano è quella meno costosa»

Anonimo

La disponibilità del calore terrestre è illimitata rispetto alla scala temporale umana e, quindi, l'energia geotermica è da considerarsi una risorsa rinnovabile e fruibile a lungo per le generazioni future; correttamente sfruttata, essa può assumere un ruolo significativo nel bilancio energetico di numerosi paesi. Le risorse geotermiche italiane, potenzialmente estraibili fino a 5 km di profondità, sono stimate in  $21 \cdot 10^{18}$  J ( $500 \cdot 10^6$  tonnellate equivalenti petrolio), di cui circa due terzi hanno temperature inferiori a 150 °C (medio - bassa entalpia). Negli ultimi decenni si è sviluppato un crescente interesse nei confronti del risparmio energetico e della produzione di energia da fonti rinnovabili: ebbene, la geotermia a bassa entalpia fornisce risposte concrete a questi quesiti, costituendo una fonte energetica alternativa, inesauribile, gratuita, disponibile ovunque e in ogni momento, pulita (con riduzione dell'emissione di sostanze inquinanti che può arrivare al 70% di un tradizionale impianto a gas). Va da sé che nelle fasi di progettazione, realizzazione ed esercizio degli impianti, riguardanti lo sfruttamento della risorsa geotermica, la corretta conoscenza della componente geologica risulti essenziale.

## Introduzione

Il calore interno della Terra costituisce un'importante risorsa energetica, la cosiddetta "energia geotermica"; esso trae origine da vari fenomeni tra i quali il decadimento di elementi radioattivi (in particolare,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$ ) ne rappresenta all'incirca la metà (The KamLAND Collaboration, 2011). Questo calore si trasferisce in superficie per "conduzione" (senza trasporto di materia) e, più raramente, per "convezione" (con trasporto di materia); ovviamente, quest'ultimo trasferimento risulta possibile nei casi in cui la permeabilità primaria e/o secondaria delle rocce consente la circolazione di fluidi (Foto 1). Allo stato attuale della tecnologia, solo la convezione termica veicolata dall'acqua sotterranea riveste importanza economica.

Il 4 luglio 1904 Piero Ginori Conti introdusse a Larderello l'uso dell'energia geotermica per produrre elettricità, sperimentando il primo generatore geotermico. Attualmente, 25 nazioni estraggono da siti geotermici calore sufficiente a garantire il riscaldamento di oltre  $2 \cdot 10^6$  di abitazioni in climi freddi ed elettricità per più di  $1,5 \cdot 10^6$  di abitazioni (Foto 2); la potenza elettrica geotermica installata è di circa 12GW<sup>1</sup> su scala mondiale, con in testa gli Stati Uniti (circa 3,5 GW) seguiti da Filippine,



Foto 1. Emergenze naturali di fluidi geotermici (Islanda).



Foto 2. La geotermia è la fortuna energetica dell'Islanda; da essa deriva il 25 % dell'elettricità ed il 90 % del riscaldamento. A sinistra, veduta aerea di una centrale geotermoelettrica; a destra, laghetto artificiale alimentato dalle acque calde (circa 90 °C) scaricate da una centrale ed attrezzato per attività balneo-terapeutiche (dintorni di Reykjavik).

Indonesia, Messico, Nuova Zelanda ed Italia (916 MW) (Holm *et al.*, 2010; Bertani, 2016).

Il quantitativo unitario medio del calore proveniente dall'interno della Terra<sup>2</sup> non è uniformemente distribuito sulla superficie terrestre; esso risulta sensibilmente diverso lungo alcune fasce geografiche, in genere interessate da particolare mobilità crostale, nelle quali anche il gradiente

si discosta notevolmente dai valori medi. Queste aree, dette di "anomalia geotermica", possono essere classificate in base all'estensione delle loro manifestazioni (regionali o locali), alla loro distribuzione lungo fasce o in zone limitate e circoscritte, al carattere primario o secondario dell'origine geotermica. In Italia, le situazioni a più elevata entalpia<sup>3</sup> (Larderello, M. Amiata, Latera, ecc.)

2. Il flusso di calore dalla Terra allo spazio è pari a 44 TW, che è solo lo 0,05 % del calore che il pianeta riceve dal Sole. L'unità di misura del flusso di calore è l'HFU (*Heat Flow Unit* = 1  $\mu\text{cal}/\text{cm}^2 \text{ sec}$ ), ma viene usato anche il  $\text{mW}/\text{m}^2$ . Il flusso di calore medio terrestre è  $87 \text{ mW}/\text{m}^2$  (Pollack *et al.*, 1993; Dickson & Fanelli, 2003); nelle zone di Larderello e del M. Amiata esso supera i  $300 \text{ mW}/\text{m}^2$  e raggiunge i  $120 \text{ mW}/\text{m}^2$  nella parte settentrionale del Graben di Siena (Barazzuoli *et al.*, 1988). Per "gradiente geotermico" si intende l'aumento di temperatura che si rileva procedendo dalla superficie verso l'interno della crosta terrestre; il relativo valore medio, nella parte più esterna, è di circa  $3 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ .

3. In geotermia si usa correntemente, al posto di temperatura, il termine *entalpia*; essa è definita come la quantità di calore assorbita o ceduta da un sistema nel caso di una sua trasformazione isobara, cioè a pressione costante.

1. Il *watt* (W) è l'unità di misura della potenza nel Sistema Internazionale; essa è pari a un *joule* al secondo (J/sec) ed è equivalente, in unità elettriche, a un *volt* per ampere. Multipli sono il *kilowatt* (kW =  $10^3$  W), il *megawatt* (MW =  $10^6$  W), il *gigawatt* (GW =  $10^9$  W) ed il *terawatt* (TW =  $10^{12}$  W).

sono determinate da anomalie a carattere locale (strutture vulcaniche, *stock* intrusivi recenti); negli altri casi, tali anomalie producono generalmente sistemi geotermici a medio-bassa entalpia.

Nella Toscana meridionale si rinvengono zone geotermiche tra le più importanti del nostro pianeta. Ciò è dovuto alla concomitante presenza di condizioni che favoriscono l'esistenza di serbatoi potenzialmente sfruttabili: 1) un elevato flusso di calore che si traduce in un anomalo stato termico del sottosuolo; 2) degli ammassi rocciosi dotati di buona o elevata permeabilità (serbatoi) che si trovano a convenienti profondità e al di sotto di una o più formazioni impermeabili (coperture); 3) un adeguato approvvigionamento idrico proveniente dalla superficie.

Il presente articolo vuole descrivere in modo sintetico le caratteristiche geotermiche dell'area considerata, in virtù delle quali vi emergono anche sorgenti termominerali (dotate cioè di particolari proprietà fisiche e terapeutiche), nonché i possibili utilizzi di questa peculiare risorsa.

### Sorgenti termominerali

La Toscana meridionale è caratterizzata da numerose sorgenti termominerali, molte delle quali note da lungo tempo ed utilizzate a scopo balneo-terapeutico, che sono legate a particolari circuiti idrogeologici (Fig. 1). Le acque meteoriche penetrano nella crosta terrestre e circolano in profondità assumendo calore dal contatto con gli strati sempre più caldi (secondo un gradiente geotermico normale o anomalo) e prendendo in carico, per dissoluzione, sostanze varie; il contenuto minerale ed il livello termico, così acquisiti, vengono talvolta in gran parte conservati dall'acqua fino alla sua emergenza in superficie perlopiù attraverso faglie. Secondo Minissale *et al.* (1997) queste acque mostrano in genere le seguenti peculiarità: a) valori sostanzialmente costanti di portata e composizione chimica ed isotopica; b) un'origine meteorica testimoniata dai rapporti isotopici  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  e  $^2\text{H}/^1\text{H}$ ; c) una residenza nel sottosuolo relativamente lunga (> 40 anni) indicata dai bassi valori di trizio<sup>5</sup>.



Foto 3. Il geyser Strokkur, ubicato nell'oasi di Geysir (Islanda), erutta un getto d'acqua alto circa 30 m ad intervalli irregolari di 3-5 minuti; il peso della colonna d'acqua riesce per pochi istanti a contrastare la spinta dovuta all'ebollizione, con la formazione di una specie di cupola contenente vapore acqueo ed altri gas. A breve distanza, è situato il Grande Geyser (ora inattivo), dal quale prendono il nome tutti i geyser del mondo.



Queste sorgenti sono talvolta connesse a particolari regimi termici (*geyser*) o fenomeni idrodinamici (ad esempio, funzionamento a sifone), manifestandosi in modo intermittente (Foto 3-4).

Un cenno particolare merita l'analisi delle loro caratteristiche geochimiche, sintetizzabili nei diagrammi della figura 2, che consente di evidenziarne due gruppi principali:

- quello delle acque bicarbonato-alcaino terrose (campo A), dove la componente dominante è costituita dalla coppia ionica  $\text{Ca}^{++}\text{CO}_3^{--}$  come riflesso di una prevalente circolazione in rocce carbonatiche (un esempio è costituito dalla sorgente delle Terme di S. Giovanni; Foto 5);
- quello delle acque solfato-alcaino terrose (campo B), dove la componente dominante è costituita dalla coppia ionica  $\text{Ca}^{++}\text{SO}_4^{--}$  come riflesso di una prevalente circolazione in rocce anidritiche (esempi sono costituiti dalle sorgenti di Bagno Vignoni e delle Terme di Saturnia; Foto 6 - 7, Fig. 3).

In definitiva, sono le formazioni carbonatico-anidritiche mesozoiche della Falda toscana a costituire il serbatoio che alimenta le sorgenti.

Le acque rappresentate nel quadrante delle clorurato-alcaino (campo C), dove la componente dominante è costituita dalla coppia ionica

$\text{Na}^+\text{Cl}^-$ , sono in genere assai più ricche in sali di quelle precedenti, anche se molto meno diffuse; un esempio è fornito dall'Acqua Borra (Foto 8). Il loro chimismo, di più difficile interpretazione, è indicato come:

- derivato da una circolazione a livello delle rocce cristalline del basamento (Panichi, 1982);
- dovuto ad un miscelamento tra un'acqua di circolazione poco profonda e condense di vapori geotermici (Fancelli & Nuti, 1975; Barazzuoli *et al.*, 1988);
- acquisito durante la loro risalita negli spessi sedimenti argillosi marini del Pliocene (almeno per quelle che emergono all'interno del Bacino di Siena-Radicofani; Duchi *et al.*, 1992).

La distribuzione dei campioni nel diagramma di Piper della figura 2 indica che all'interno dei gruppi principali a) e b) si verifica qualche fenomeno responsabile delle deviazioni osservate (Panichi, 1982). Per quanto riguarda le acque bicarbonato-alcaino terrose, si riconosce facilmente che solo alcune sono rappresentative di una circolazione in serie carbonatiche, mentre nelle altre si riscontra un progressivo miscelamento con acque circolanti in serie anidritiche. In relazione alle acque solfato-alcaino terrose, le variazioni dei rapporti chimici sembrano at-



Fig. 1. Schema della circolazione idrica delle sorgenti termominerali (Barazzuoli & Salleolini, 1993).

4. I rapporti isotopici sono basati sul confronto tra la quantità misurata nel campione in esame rispetto a quella presente in un campione *standard*, in termini di rapporto tra gli isotopi pesante (raro) e leggero (comune); per gli isotopi stabili dell'acqua ( $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$ ), il riferimento è lo *Standard Mean Ocean Water* (SMOW).

5. Il trizio (o tritio) è l'isotopo radioattivo dell'idrogeno ( $^3\text{H}$ ), con tempo di dimezzamento pari a 12,43 anni; esso viene utilizzato per calcolare l'età relativa dei campioni (cioè del tempo intercorso dalla separazione dal sistema atmosferico), in quanto presente in elevate concentrazioni nelle acque più giovani, coprendo un intervallo teorico di circa 50 anni.





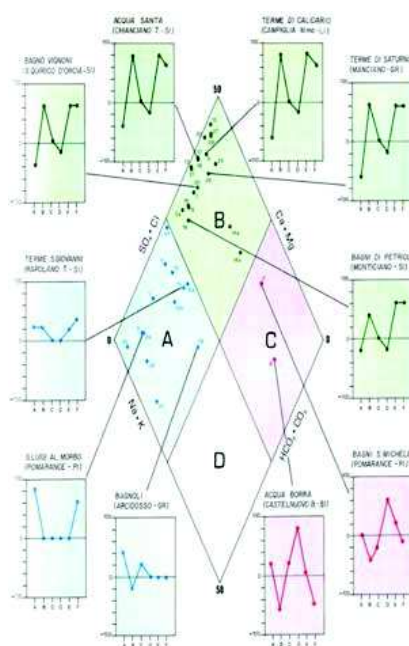
**Foto 4.** La sorgente delle Terme dell'Antica Querciolaia (Rapalano Terme), con valori medi di temperatura e di portata rispettivamente di circa 39 °C e di 1.700 m³/giorno. Essa presentava due particolari caratteristiche idrologiche (Barazzuoli et al., 1988).

- l'intermittenza nell'emissione, generata da un fenomeno di *gas-lift* tale da provocare l'espulsione violenta di un getto d'acqua mista a gas (il getto variava in altezza da 0 a 4-5 m sul p.c. in un intervallo di tempo di circa 13 minuti e si ripeteva, in condizioni normali, con periodicità pressoché costante);
- la scomparsa ricorrente.

Questa sorgente non esiste più a seguito della captazione dell'acqua termale tramite pozzi al fine di garantire un regolare approvvigionamento delle attuali attività balneo-terapeutiche.

tribuibili ad un fenomeno analogo al precedente, ma che procede in senso opposto: al fenomeno della lisciviazione delle anidriti si sovrappone quello dovuto alla presenza di rocce carbonatiche, intese come componenti secondarie della successione litologica attraversata dalle acque termominerali.

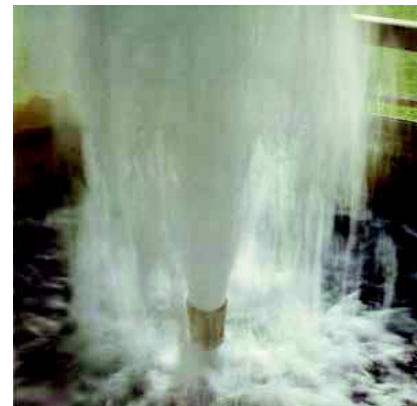
Le acque clorurato-alcaline, che si presentano generalmente più costanti nelle loro caratteristiche chimiche e conseguentemente nei loro sistemi idrotermali, appaiono talvolta derivare da un miscelamento con quelle circolanti nelle serie anidritiche (vedi sorgente n. 2). Lo stesso fenomeno, ma con proporzioni inverse, sembra



**Fig. 2.** Diagrammi di Piper e rettangolari relativi alle principali sorgenti termominerali della Toscana meridionale (Barazzuoli & Salleolini, 1993). I dati chimici utilizzati sono ripresi da Bencini et al. (1977) e Fanelli et al. (1982).

da associare al chimismo delle sorgenti 14a e 14b.

I depositi travertinosi sono spesso messi in relazione con queste sorgenti, così come la loro presenza può rappresentare la traccia di vecchie manifestazioni termominerali ora scomparse. In proposito è da sottolineare che i travertini non derivano solo da acque con specifica composizione bicarbonato-alcalino terrosa; infatti, dato che questo fenomeno dipende essenzialmente dalla concentrazione assoluta degli ioni  $\text{Ca}^{++}$  e  $\text{HCO}_3^-$ , può aversi precipitazione di travertino anche da acque più solfatiche o, addirittura, cloruriche (ad esempio, all'Acqua Borra).



**Foto 5 -** Terme di S. Giovanni (Comune di Rapalano Terme): a sinistra, veduta della principale fuoriuscita d'acqua con valori medi di temperatura sui 38 °C e di portata intorno ai 13 L/s; a destra, veduta dell'adiacente deposito travertino caratterizzato da una fenditura, con deboli emissioni liquido-gassose, dalla quale emergeva la sorgente vera e propria prima della captazione tramite pozzo.



**Foto 6 -** Vasca termale di Bagno Vignoni (Comune di S. Quirico d'Orcia): si tratta di una sorgente con valori medi di temperatura sui 38 °C e di portata intorno ai 20 L/s. Sullo sfondo si intravede la Rocca d'Orcia.

## Energia geotermica

Per finalità pratiche, tra le risorse geotermiche della Toscana meridionale possono essere distinte quelle ad alta entalpia (temperatura del fluido<sup>6</sup> reperito > 150 °C), atte alla produzione di energia elettrica o calore per usi industriali, e quelle a medio-bassa entalpia (temperatura del fluido < 150

°C), idonee solo per lo sfruttamento diretto dei fluidi caldi in ambito civile, agricolo ed industriale (Fig. 4).

### RISORSE AD ALTA ENTALPIA

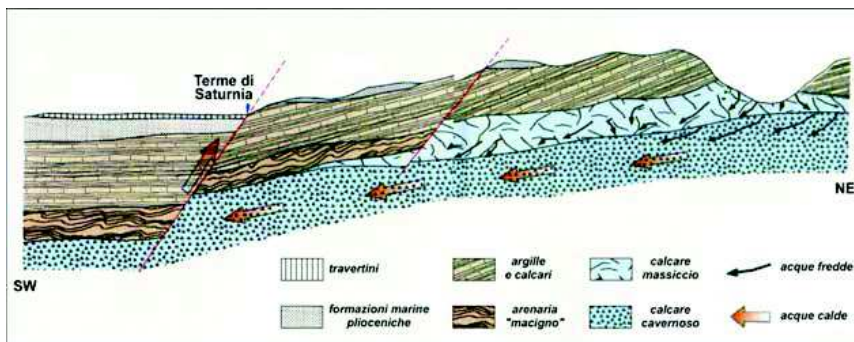
Appartengono a questo tipo i sistemi geotermici del M. Amiata (ad acqua dominante<sup>7</sup>), di Lardello e di Travale-Radicondoli (Fig. 5) (a vapore

6. Per fluido geotermico si intende una miscela di acqua sia in fase liquida, nella quale sono disciolte quantità variabili di sali e sostanze gassose, che in fase di vapore, alla quale sono legate altre sostanze volatili quali  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , ecc.

7. Questi sistemi geotermici producono acqua in fase liquida o miscele acqua-vapore e sono quelli maggiormente diffusi nel mondo (circa il 90 % dei serbatoi idrotermali); essi contengono acqua in fase liquida che, quando estratta, presenta



**Foto 7** - Una delle piscine formate dal corso d'acqua alimentato dallo stabilimento termale di Saturnia (Comune di Manciano). La sorgente mostra valori medi di temperatura e di portata rispettivamente intorno ai 38 °C e da 450 a 560 L/s (ARPAT, 2014).



**Fig. 3.** Schema del circuito idrico sotterraneo nella formazione del "Calcare cavernoso" che alimenta le Terme di Saturnia (Chetoni, 2000, modificato). La zona di ricarica è costituita principalmente dall'affioramento della vasta formazione calcarea presente nella zona di San Martino sul Fiora, a cui si aggiungono apporti provenienti da Poggio il Sasso. Durante il percorso nel sottosuolo l'acqua raggiunge profondità superiori a 700 m e prende in soluzione i notevoli quantitativi di solfato di calcio che caratterizzano il "Calcare cavernoso". La sua rapida risalita entro la copertura argillosa impermeabile, permessa dalla presenza di una faglia dominante, spiega il fatto che sono mantenute pressoché intatte alla sorgente le caratteristiche termiche e saline. L'esame isotopico delle acque termali ha evidenziato che il loro tempo di residenza medio nel sottosuolo è dell'ordine dei 30-40 anni (Battaglia *et al.*, 1992; Minissale *et al.*, 1997; Barbagli *et al.*, 2013).

dominante<sup>9)</sup>, con una potenza elettrica installata complessiva di oltre 900 MW ed una produzione energetica di quasi 5,7 TWh all'anno (Bertani, 2005, 2016; Conti *et al.*, 2016). Questi sistemi pro-

ducono fluidi contenuti principalmente nelle formazioni anidritiche e carbonatiche mesozoiche della Falda toscana, le quali sono caratterizzate da un'elevata permeabilità secondaria e ricoperte

in superficie temperature variabili tra 30 e 100 °C (Bertani, 2005). In genere il serbatoio non ha una copertura di rocce impermeabili ed è situato a bassa profondità; in superficie questi sistemi sono spesso associati a manifestazioni termali con temperature moderate. Quando invece il campo geotermico presenta una copertura impermeabile, l'acqua è in grado di raggiungere temperature maggiori di 100 °C, pur restando ancora in fase liquida, come avviene in una pentola a pressione.

8. In alcuni serbatoi geotermici, geologicamente simili ai precedenti, la temperatura è così elevata che il fluido è presente sotto forma di vapore secco, ad alto valore energetico: questo può essere inviato direttamente alla turbina dell'impianto. Il più grande serbatoio di questo tipo, sfruttato da più di 50 anni, è "The Geyser" (California, USA).



**Foto 8.** L'Acqua Borra (Comune di Castelnuovo Berardenga) ed i relativi depositi travertinosi; si tratta di una sorgente con valori medi di temperatura intorno ai 37 °C e di portata pari a 1 L/s.

da formazioni impermeabili giurassico-eoceniche e neogeniche; fluidi di buona qualità, in quantità commercialmente sfruttabili, vengono prodotti anche da fratture del sottostante basamento metamorfico fino ad oltre 4.000 m di profondità.

Dallo schema idrogeologico di figura 6 risulta chiaro come nell'area di Larderello siano presenti ampie zone, circondate da una spessa copertura impermeabile, dove l'infiltrazione delle acque meteoriche avviene nelle stesse formazioni che costituiscono il serbatoio geotermico. In corrispondenza della zona di produzione è altresì evidente la forte depressione della superficie piezometrica. Una conseguenza di questo intenso sfruttamento è la sostanziale scomparsa delle manifestazioni naturali (vapori, soffioni, *bulicami*, ecc.) che hanno caratterizzato il territorio per millenni (Foto 9).

La sezione della figura 7 mostra la peculiare situazione idrogeologica del M. Amiata. Le vulcaniti sono molto permeabili per fessurazione (e subordinatamente per porosità) e costituiscono un acquifero freatico alimentato solo dall'infiltrazione meteorica, frazione delle piogge e delle nevi cadute sul rilievo. Un complesso floscoide di bassa permeabilità le separa dal sottostante serbatoio geotermico (con temperature dell'ordine dei 200 °C) formato in

prevalenza da litotipi fratturati di facies toscana. In ambedue gli acquiferi la circolazione idrica è quella tipica delle "falde in rete"; più specificatamente, i deflussi seguono la diffusa micro-fratturazione della roccia e si concentrano nelle fratture beanti.

Un notevole incremento delle risorse geotermiche potrebbe essere ottenuto, in un prossimo futuro, dall'intensificarsi della produzione da serbatoi più profondi (oltre 4.000 m). Nella zona di Larderello i fluidi profondi sono stati rinvenuti in orizzonti fratturati all'interno delle formazioni metamorfiche e perfino nella parte superiore delle sottostanti intrusioni magmatiche granitoidi; alla sommità del serbatoio superficiale la temperatura supera localmente i 250 °C, mentre in profondità si distribuisce più uniformemente e supera i 400 °C. Il quadro emergente dall'esplorazione geotermica profonda nella Toscana meridionale si presenta assai incoraggiante dato che le dimensioni della zona termicamente anomala crescono enormemente con la profondità; nella zona di Larderello e Travale-Radicondoli, ad esempio, il sistema geotermico presenta all'incirca una superficie di 400 km<sup>2</sup> a 3.000-4.000 m di profondità, con temperature di 300-350 °C e pressioni di 6-7 MPa<sup>9)</sup> (Conti *et al.*, 2016). D'altra parte, in questa esplorazione si sono

9. Il *pascal* (Pa), unità di misura dello sforzo e della pressione nel Sistema Internazionale, equivale a un *newton* su metro quadrato (N/m<sup>2</sup>); è da considerare che, mentre sulla Terra la pressione atmosferica al livello del mare è pari a 0,1 MPa, sul pianeta Venere la pressione atmosferica è dell'ordine dei 9 MPa (MPa = *megapascal*, pari a 10<sup>6</sup> Pa). Il *newton* (N), unità di misura della forza, è definito come la quantità di forza necessaria per imprimere a un chilogrammo di massa un'accelerazione di un metro al secondo quadrato.



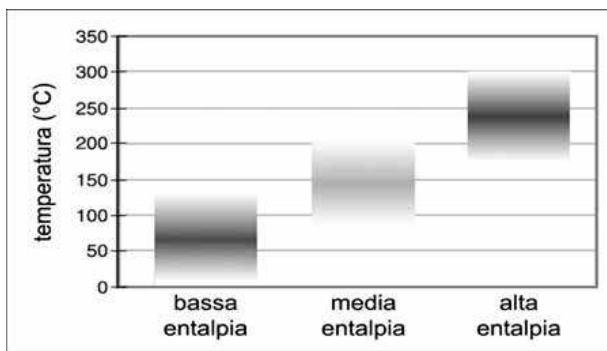


Fig. 4. Classificazione delle risorse geotermiche in base alla temperatura del fluido reperito (Banks, 2012, modificata).

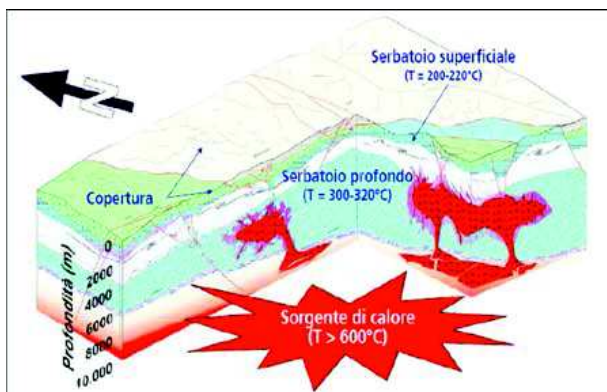


Fig. 5. Modello concettuale schematico dell'area geotermica di Larderello-Travale (Vaccaro, 2012).

manifestati anche diversi problemi legati alla distribuzione irregolare delle fratture (e quindi della permeabilità) nel basamento cristallino, alle altissime pressioni e temperature che vi si riscontrano (anche maggiori di 20 MPa e 400 °C) ed all'aggressività dei fluidi sugli strumenti di perforazione.

#### RISORSE A MEDIO-BASSA ENTALPIA

Il territorio italiano (in particolare, Toscana, Lazio e Campania) è interessato anche dall'ampia

diffusione di serbatoi termali relativamente superficiali, il cui contenuto calorico può essere convenientemente sfruttato non tanto per la produzione di energia elettrica quanto per finalità domestiche, agricole ed industriali. Un approccio di questo tipo, in verità poco diffuso nel nostro Paese, ha avuto nel tempo un aumento di consensi se non altro per l'introduzione di incentivi e sgravi fiscali (Tab. 1); il riscaldamento di ambienti, ad esempio, è realizzato per il 72 % con le cosiddette "pompe di calore" (514 MWtermici e 3.160 TJ/anno<sup>10</sup>, a fine 2015),

10. Il joule (J), unità di misura dell'energia, del lavoro e del calore nel Sistema Internazionale, è pari al lavoro compiuto dalla forza di 1 newton quando il suo punto di applicazione si sposta di 1 metro nella direzione della forza ( $TJ = \text{terajoule} = 10^{12} \text{ J}$ ). In pratica, un joule corrisponde pari al lavoro richiesto per sollevare una massa di 102 g per un metro, opponendosi alla forza di gravità terrestre.

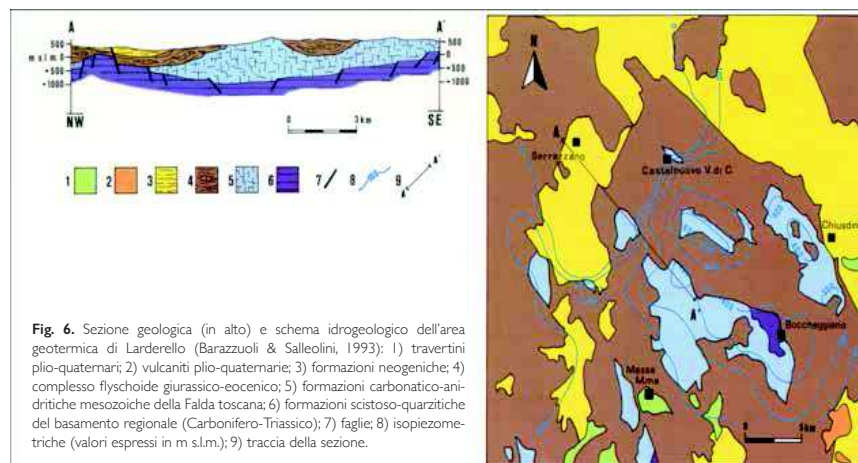


Fig. 6. Sezione geologica (in alto) e schema idrogeologico dell'area geotermica di Larderello (Barazzuoli & Salleolini, 1993): 1) travertini plio-quaderni; 2) vulcaniti plio-quaderni; 3) formazioni neogeniche; 4) complesso flyschoidale giurassico-eocenico; 5) formazioni carbonatiche anidritiche mesozoiche della Falda toscana; 6) formazioni scisto-quarzitiche del basamento regionale (Carbonifero-Triassico); 7) faglie; 8) isopiezometriche (valori espressi in m s.l.m.); 9) traccia della sezione.



Foto 9. Dal basso, in senso orario:  
• emissione naturale di vapori geotermici (Monterotondo Marittimo);  
• la Valle del Diavolo (Larderello) in una stampa del XIX secolo;  
• il bulicame, pozza d'acqua e fango in ebollizione.

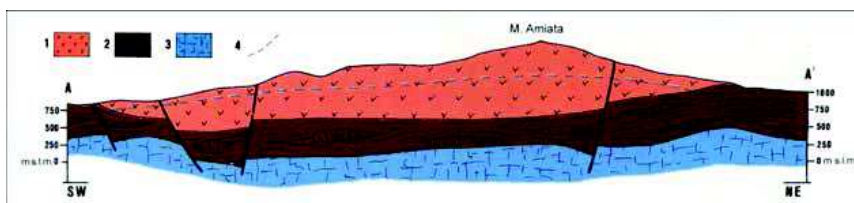


Fig. 7. Sezione idrogeologica del M. Amiata (Barazzuoli & Salleolini, 1993): 1) vulcaniti quaternarie; 2) complesso flyschoidale cretaceo; 3) formazioni carbonatiche-anidritiche mesozoiche; 4) limite di saturazione nell'acquifero vulcanico.

la cui potenza installata è più che raddoppiata negli ultimi anni. Grazie al lavoro svolto da un compressore elettrico in grado di realizzare un “ciclo frigorifero”, queste pompe consentono il trasferimento di energia termica da un corpo più freddo (il fluido geotermico accessibile a 5-20 °C tramite pozzi poco profondi) ad un altro a temperatura superiore; tale trasferimento non può avvenire in maniera spontanea perché comporterebbe una violazione del secondo principio della termodinamica<sup>11</sup>.

L'impiego diretto dell'energia geotermica ha consentito un risparmio di 53 · 10<sup>6</sup> tonnellate di petrolio su scala mondiale (Lund & Boyd, 2016), con una conseguente riduzione dell'inquinamento e dell'emissione di anidride carbonica nell'atmosfera (-149 · 10<sup>6</sup> tonnellate di CO<sub>2</sub>). Questa utilizzazione avviene soprattutto mediante le pompe di calore (55 %), previste in forte diffusione nei prossimi decenni; altri importanti usi diretti sono il termalismo (20 %), il riscaldamento di ambienti (15 %) e la serraicoltura (5 %).

Nel settore settentrionale del Bacino di Siena sono state identificate (Barazzuoli *et al.*, 1988) zone di particolare interesse per l'impiego razionale delle risorse energetiche. Una delle più note è quella di Rapolano Terme (Fig. 8). Gli studi ivi condotti hanno permesso di schematizzare i circuiti idrotermali e di valutare il contributo locale alla ricarica del serbatoio principale, caratterizzato da temperature

comprese tra 60 e 80 °C. L'alto grado di correlazione esistente tra i parametri fisico-chimici delle emergenze locali è causato dal miscelamento, in varie proporzioni, tra acque più saline e profonde (tipo Terme di S. Giovanni) ed acque meno saline e più superficiali. Tutte le sorgenti appartengono allo stesso sistema geotermico (unico serbatoio con circolazione idrica principale nella successione carbonatica), ma si differenziano per il tipo di circuito idrotermale. Un'altra zona che si distingue è ubicata nei dintorni di Castelnuovo Berardenga. Essa è da considerarsi interessante perché, insieme alla presenza di un alto strutturale e di un elevato flusso di calore (circa 120 mW/m<sup>2</sup>), vi si riscontrano indicazioni geochemiche che testimoniano una circolazione idrica nel basamento cristallino (Fig. 9); inoltre, il serbatoio è ubicato ad una profondità di circa 600 m e presenta acque con temperature tra 80 e 100 °C. Quelle che fuoriescono, quindi, appaiono il risultato di un miscelamento tra un fluido proveniente dal basamento cristallino (ad alta temperatura e particolarmente ricco in Na<sup>+</sup> e Cl<sup>-</sup>) ed un'acqua di circolazione in rocce carbonatiche, meno profonda, meno calda e ricca in Ca<sup>++</sup> e HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>; comparabile con quelle emergenti a Rapolano Terme.

Gli impianti geotermici a bassa entalpia (temperatura del fluido < 90 °C) permettono lo sfruttamento del sottosuolo a fini energetici, anche in

Tabella 1 - Usi diretti del calore geotermico in Italia a fine 2015 e sviluppo nel periodo 2010-2015 (Conti *et al.*, 2016)

Uso	Potenza (fine 2015)		Energia (fine 2015)		Sviluppo 2010-2015	
	(MWtermici)	(%)	(TJ/anno)	(%)	Potenza (%)	Energia (%)
Riscaldamento di ambienti	716	52	4.445	42	+ 82	+ 71
Agricoltura	83	6	683	7	+ 21	+ 19
Itticoltura	120	9	1.869	18	- 1	- 3
Processi industriali	18	1	156	1	+ 26	+ 46
Balneologia termale	435	32	3.346	32	+ 4	- 3
TOTALE	1.372	100	10.499	100	+ 32	+ 30

assenza di anomalie termiche, mediante installazioni (sviluppate a profondità da qualche metro a non più di 200 m) che lo utilizzano come serbatoio termico da cui estrarre ed in cui introdurre calore. In altre parole, il calore sotterraneo viene sfruttato attraverso il diretto uso dell'acqua e

del terreno come fonti energetiche; con il giusto dimensionamento degli impianti (questi sono a bassa, 5-15 kWt, a media, 40-70 kWt, ad elevata potenza, > 100 kWt), tali elementi rappresentano accumulatori “infiniti” in grado di fornire durante l'anno calorie e frigorifici<sup>12</sup>. Queste installazio-

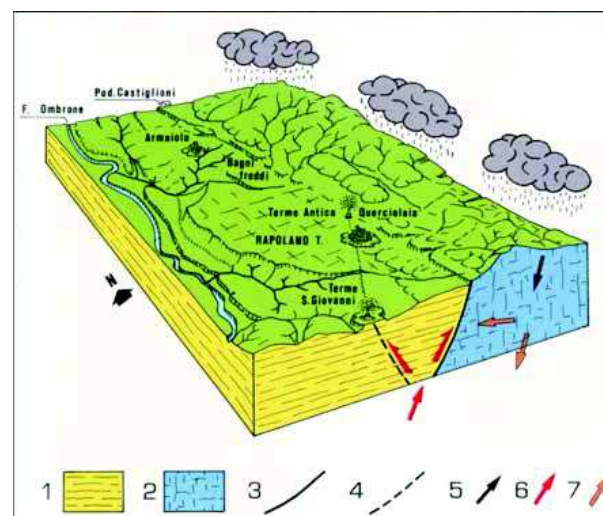


Fig. 8. Schema della situazione strutturale ed idrogeologica dell'area di Rapolano Terme (Barazzuoli *et al.*, 1988, modificata): 1) copertura neogenica; 2) serbatoio principale carbonatico; 3) faglia di Rapolano Terme; 4) faglia delle Terme di S. Giovanni; 5) acque di origine meteorica; 6) acque profonde; 7) acque con caratteristiche fisico-chimiche intermedie.

11. Esso enuncia l'irreversibilità di molti eventi termodinamici quali, ad esempio, il passaggio di calore da un corpo caldo ad uno freddo senza l'apporto di lavoro esterno. Il dispositivo che compie il “ciclo frigorifero” può essere utilizzato: i) come macchina frigorifera, il cui scopo è di sottrarre calore ad un ambiente freddo e di trasferirlo ad un caldo (questo effetto è quindi utilizzato nei frigoriferi e nei condizionatori d'aria); ii) come pompa di calore, il cui scopo è fornire calore ad un ambiente caldo, prelevandolo da un ambiente più freddo.

12. La *caloria* (cal) è comunemente definita come l'energia necessaria per innalzare di 1 °C (da 14,5 a 15,5) la temperatura di 1 g di acqua distillata alla pressione di 1 atm. La *frigorificia* (Fr) è l'unità di misura dell'energia usata dai sistemi di raffreddamento e dai condizionatori ed è equivalente alla chilocaloria (1 Fr = 1 kcal), cioè alla quantità di calore che deve essere sottratta da 1 kg d'acqua distillata per abbassarne la temperatura da 15,5 °C a 14,5 °C alla pressione di 1 atm.



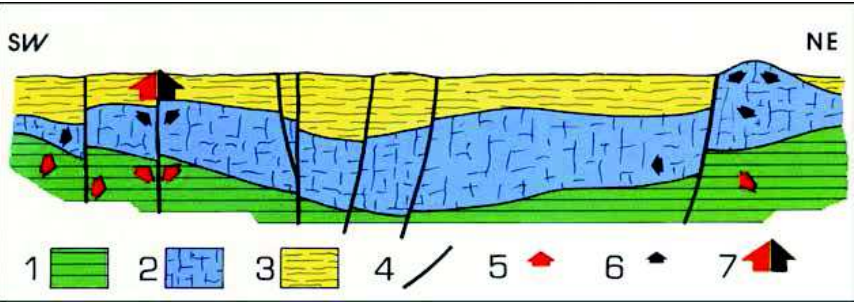


Fig. 9. Schema della situazione strutturale ed idrogeologica del settore nord-orientale del Bacino di Siena (Barazzuoli *et al.*, 1988, ridisegnata): 1) basamento cristallino; 2) serbatoio principale carbonatico; 3) complesso delle formazioni argillose neogeniche e delle formazioni cretaco-mioceniche (copertura); 4) faglie; 5) circolazione di un fluido geotermico a livello del basamento; 6) circolazione di un fluido geotermico a livello del serbatoio principale carbonatico; 7) circolazione risultante dal miscelamento tra i due fluidi precedenti (Sorgente dell'Acqua Borra).

ni sono molto vantaggiose in quanto: 1) hanno una durata di gran lunga superiore a quella degli edifici che le ospitano; 2) costituiscono un unico sistema in grado di fornire riscaldamento, raffrescamento e acqua calda sanitaria; 3) hanno costi di gestione e manutenzione molto bassi; 4) presentano una maggiore efficienza ed economicità rispetto agli impianti tradizionali (Tab. 2).

La corretta progettazione di un impianto geotermico assegna un ruolo fondamentale al geologo il quale, partendo dal fabbisogno energetico dell'immobile, calcola come e quanta energia estrarre dalla fonte fredda per far sì che la pompa di calore riesca a fornire le calorie e frigorifiche necessarie. Il dimensionamento di un campo sonde, soprattutto per la predisposizione di impianti di media ed elevata potenza, prevede l'esecuzione di un *test* finalizzato a determinare le caratteristiche del terreno e le sue proprietà termiche; questo *test*, detto di "risposta geotermica" (*Ground Response Test - GRT*), va effettuato direttamente *in situ* mediante un pozzo di prova munito di sonda geotermica (Foto 10).

Questo *test* consente di calcolare, con buona approssimazione, la conducibilità termica<sup>13</sup>

media del terreno relativa alla lunghezza della sonda (Tab. 3), la resistenza termica riscontrata nel complesso sonda/terreno e la temperatura media del terreno. Tramite questi dati risulta possibile definire l'entità del "serbatoio geotermico" che verrà sfruttato e, quindi, progettare l'impianto; una sonda verticale di 100 metri consente di estrarre, in media, da 2 a 7 kWt.

Gli impianti a bassa entalpia sono comunemente distinti in: *open-loop* e *closed-loop*. I primi prelevano il calore direttamente dall'acqua sotterranea che, nel corso dell'anno, mantiene una temperatura praticamente costante e pari alla temperatura media dell'aria o maggiore nel caso di acquifero profondo. Essi sono costituiti da uno o più pozzi di estrazione dell'acqua di falda da cui si preleva il calore mediante degli scambiatori inseriti nella pompa di calore (Fig. 10); dopo aver completato il proprio scambio e senza aver subito alcuna alterazione chimica, l'acqua può essere usata per altri fini, ma solitamente viene re-immessa nell'acquifero mediante uno o più pozzi situati "a valle" (secondo il flusso della falda) rispetto ai pozzi di estrazione. Attraverso

13. La conducibilità termica è una misura dell'attitudine di una sostanza a trasmettere il calore; nelle unità del Sistema Internazionale, essa è misurata in *watt su metro-kelvin* [W/(m·K)], essendo il *watt* (W) l'unità della potenza, il metro (m) l'unità della lunghezza e il *kelvin* (K) l'unità della temperatura. Il suo inverso è la resistenza termica (m·K/W).

Tabella 2 - Caso reale di sostituzione di impianto da fossile a geotermico con il conseguimento di un significativo risparmio economico, soprattutto dal punto di vista dell'utilizzo (dati forniti dallo Studio Ecogeo).

RISCALDAMENTO INVERNALE		RAFFRESCAMENTO ESTIVO	
<b>Dati gas metano</b>			
Potere calorifico d'uso PC <sub>u</sub>	8,60 kWh/L	Ore di funzionamento al giorno	12,00 h
Grado di rendimento impianto	0,90 h	Fabbisogno estivo mediante <i>ciller</i>	27.950,00 kWh
Costo del gas metano	0,70 €/m <sup>3</sup>	Costo energia elettrica diurna	0,20 €/kWh
Costo del gas metano	0,08 €/kW	Costo annuo raffrescamento estivo	5.590,00 €
Costo annuo gas metano	18.372,52 €	Fabbisogno estivo con <i>freecooling</i>	9.480 kWh
<b>Dati termopompa</b>		Costo annuo raffrescamento estivo con <i>freecooling</i>	1.896,00 €
Coefficiente di prestazione annuo	4,40 m	Totale superficie appartamenti	3.075,00 m <sup>2</sup>
Costo energia elettrica diurna	0,20 €/kWh	Costo appartamento con <i>ciller</i>	2,95 €/m <sup>2</sup>
Costo energia elettrica notturna	0,17 €/kWh	Costo appartamento con <i>freecooling</i>	0,62 €/m <sup>2</sup>
Costo annuo termopompa	8.382,34 €	Risparmio sui costi con <i>freecooling</i>	79,09 %
Costo annuo appartamento con caldaia a gas	5,96 €/m <sup>2</sup>		
Risparmio annuo	9.945,18 €		
Costo annuo appartamento con termopompa	2,73 €/m <sup>2</sup>		
Risparmio sui costi con termopompa	54,26%		

la re-immissione della stessa quantità d'acqua estratta si assicura non solo la ricarica dell'acquifero e quindi la sostenibilità della risorsa, ma

si evitano anche fenomeni di subsidenza. I sistemi *open-loop* possono essere realizzati in presenza di un acquifero in grado di fornire una portata

Tabella 3 - Conducibilità termica, potenza di estrazione e lunghezza della sonda geotermica per alcune tipologie di sottosuolo (Gehlin, 1998): COP = coefficiente di prestazione, dato dal rapporto tra il calore immesso (riscaldamento) o estratto (raffrescamento) e il consumo di energia (solitamente elettrica) dell'edificio.

Tipo di sottosuolo	Conducibilità termica	Potenza di estrazione	Lunghezza della sonda per kW di potenza di riscaldamento (m)	
	[W/(m·K)]		COP = 3	COP = 3,5
Rocce sciolte asciutte	< 1,5	20	33	36
Rocce consolidate o sciolte sature d'acqua	1,5 - 3,0	50	13	14
Rocce consolidate a cond. termica elevata	> 3,0	70	9,5	10
Ghiaia e sabbia asciutte	0,4	< 20	> 33	> 36
Ghiaia e sabbia sature	1,8 - 2,4	55 - 65	10 - 12	11 - 13
Argilla e limo umidi	1,7	30 - 40	17 - 22	18 - 24
Calcare	2,8	45 - 60	11 - 15	12 - 16
Arenaria	2,3	55 - 65	10 - 12	11 - 13
Granito	3,4	55 - 70	9,5 - 12	10 - 13
Basalto	1,7	35 - 55	12 - 19	13 - 20
Gneiss	2,9	60 - 70	9,5 - 11	10 - 16

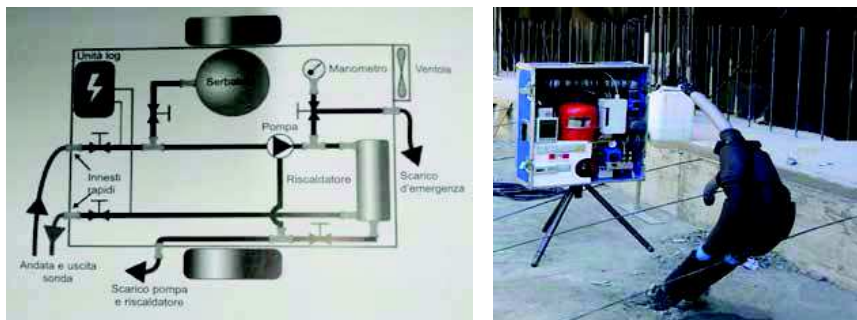


Foto 10. A sinistra, schema del funzionamento e dei componenti interni del macchinario usato per il test di risposta geotermica (Tinti, 2008); a destra, come si presenta il macchinario (foto Studio Ecogeo).

minima costante durante l'anno captando la risorsa possibilmente (per motivi energetici) entro i primi 30-40 m di profondità.

I secondi impianti, più diffusi dei precedenti ed applicabili praticamente ovunque, sono formati da una o più sonde geotermiche le cui estremità apicali convergono dentro un collettore *master* geotermico atto a trasferire l'energia allo scambiatore della pompa di calore (Figg. 11-12).

Esistono varie tipologie di sonde geotermiche (Fig. 13): le più comuni sono quelle verticali a doppia U (Fig. 14), le quali sono disposte con diverse geometrie e distanze reciproche a seconda della conducibilità termica del terreno e sono inserite in numero crescente con l'aumento del fabbisogno energetico del fabbricato. La loro installazione-

ne nel terreno avviene previa perforazione di un pozzo avente esclusiva finalità geotermica (Foto 11); successivamente sono cementate con una miscela di cemento e bentonite, la quale assicura compatibilità ambientale, caratteristiche di resistenza ed una buona conduzione termica [ $0,6-0,7 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ] tra sonda e terreno.

I sistemi a collettori orizzontali sono sicuramente più economici rispetto a quelli con sonde verticali; essi risultano, tuttavia, di gran lunga meno efficienti per il fatto che, essendo posati orizzontalmente a soli 2-3 m dal piano di calpestio, risentono delle fluttuazioni della temperatura superficiale (Foto 12).

Un altro tipo di scambiatore è rappresentato dai pali energetici (Foto 13). Nella fase iniziale della

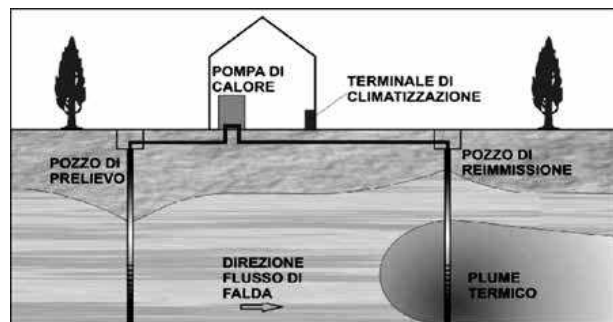


Fig. 10. Schema di un sistema open-loop (Tinti, 2008).

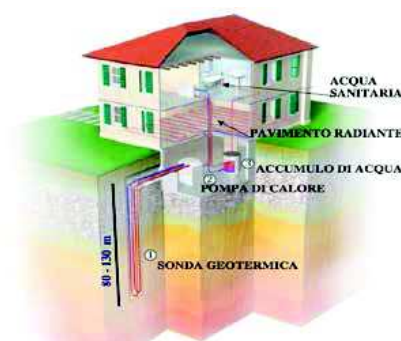


Fig. 11. Funzionamento in modalità riscaldamento\* di un impianto geotermico a bassa entalpia closed-loop con sonde verticali (schema fornito dallo Studio Ecogeo).

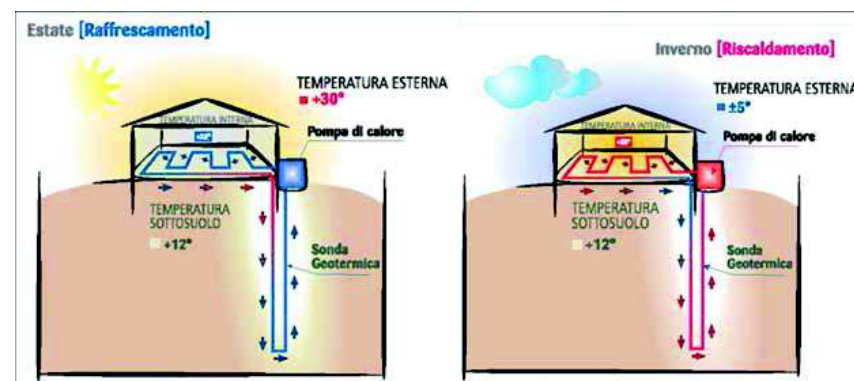


Fig. 12. Sistema closed-loop in modalità raffrescamento e riscaldamento (Delmastro & Noce, 2011).

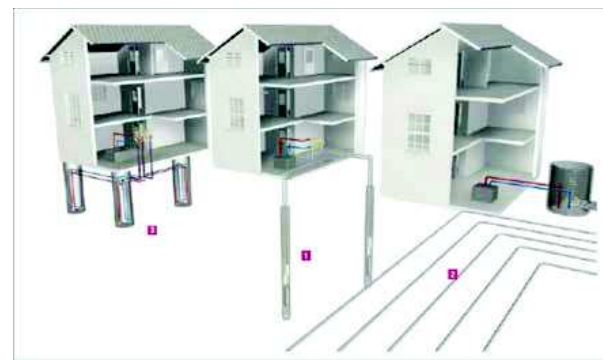


Fig. 13. Sistemi di climatizzazione con varie tipologie di sonde geotermiche: 1 = sonde verticali; 2 = collettori orizzontali infissi nel terreno; 3 = sonde infisse direttamente nelle fondazioni (pali energetici).

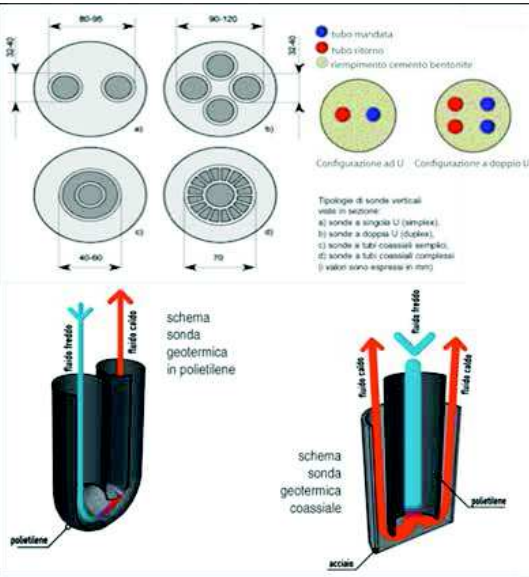


Fig. 14. In alto: a sinistra sono evidenziate le sezioni di pozzi con varie tipologie di sonde verticali; a destra è raffigurato il riempimento dei pozzi. In basso: immagini tridimensionali di una sonda ad U (a sinistra) ed una coassiale.



Foto 11. A sinistra, torre di perforazione per lo scavo del pozzo geotermico; a destra, macchinario che srotola la sonda all'interno del pozzo (foto Studio EcoGeo).

costruzione di un edificio, i collettori sono inseriti direttamente nei pali di fondazione; avendo questi profondità variabile da pochi metri ad alcune decine di metri, è possibile portare un contributo

energetico al fabbricato anche se non paragonabile a quello di una sonda geotermica.

È da sottolineare, infine, che l'attività degli impianti geotermici a bassa entalpia sembra provo-

care nel serbatoio sfruttato la formazione di un *plume* termico (vedi Fig. 10), ma che quest'ultimo si uniforma nel bilancio annuo e si stabilizza nel corso degli anni (Rybach & Eugster, 2002); qualora venga effettuato un corretto dimensionamento, tale tipo di impianti è da considerarsi pertanto sostenibile dal punto di vista ambientale.

Conclusioni

L'energia geotermica costituisce oggi meno dell'1 % della produzione energetica mondiale (IEA, 2007) e fornisce circa il 2 % dell'elettricità e il 5 % del calore per usi diretti rispetto all'insieme delle fonti rinnovabili (Fridleifsson, 2003). Il calore interno del nostro pianeta è enorme, dell'ordine dei  $13 \cdot 10^{30}$  J in totale e  $5 \cdot 10^{27}$  J nella sola crosta terrestre, ma soltanto una parte di esso può essere sfruttato (Dickson & Fanelli, 2003); sulla base delle stime effettuate da Tester *et al.* (2006) per gli USA, si può ritenere che con le attuali tecnologie sia possibile recuperare ri-

sorse geotermiche tali da soddisfare per almeno 2.000 anni il fabbisogno mondiale di energia primaria, pari a circa  $10^{21}$  J/anno (IEA, 2017), rendendo quindi "inutile" qualsiasi altra fonte non rinnovabile utilizzata.

I maggiori vantaggi in ambito geotermico riguardano la vasta riserva di energia usufruibile nei pressi dei giacimenti, il moderato rendimento energetico netto dei bacini grandi e facilmente sfruttabili, le minori emissioni di anidride carbonica per unità di energia rispetto ai carburanti fossili e, infine, un costo competitivo nella produzione energetica (Tab. 4). I principali svantaggi sono invece costituiti dalla scarsità di giacimenti facilmente accessibili, dalla necessità di una loro accurata amministrazione per evitarne il rapido esaurimento e dal rischio di degrado ambientale dovuto allo sfruttamento. Relativamente allo sfruttamento geotermico sembra opportuno sottolineare come da esso possano derivare livelli medio-alti di inquinamento atmosferico e cambiamenti del clima locale; è altrettanto vero, però, che gli effetti di tali problematiche sono ritenuti dalla comunità scientifica minori rispetto a quelli

Tabella 4 - Costo dell'energia prodotta e costi di impianto per la generazione di elettricità e per gli usi diretti del calore (Fridleifsson, 2001): US¢ = cent USA; US\$ = dollari USA.

Generazione di elettricità	Costo dell'energia	Potenziale costo futuro dell'energia	Costi di impianto chiavi in mano
	(US¢/kWh)	(US¢/kWh)	(US\$/kW)
Biomasse	5 - 15	4 - 10	900 - 3.000
Geotermia	2 - 10	1 - 8	800 - 3.000
Eolico	5 - 13	3 - 10	1.100 - 1.700
Solare fotovoltaico	25 - 125	5 - 25	5.000 - 10.000
Solare termico	12 - 18	4 - 10	3.000 - 4.000
Maree	8 - 15	8 - 15	1.700 - 2.500
Usi diretti del calore	Costo dell'energia	Potenziale costo futuro dell'energia	Costi di impianto chiavi in mano
	(US¢/kWh)	(US¢/kWh)	(US\$/kW)
Biomasse (compreso etanolo)	1 - 5	1 - 5	250 - 750
Geotermia	0,5 - 5	0,5 - 5	200 - 2.000
Eolico	5 - 13	3 - 10	1.100 - 1.700
Solare a bassa temperatura	3 - 20	2 - 10	500 - 1.700





Foto 12. Configurazioni dei collettori orizzontali: a doppio meandro (sinistra); a spirale (destra) (foto Oberthal Energy s.r.l.).

causati dall'uso di combustibili fossili o dalle centrali nucleari (Boyle, 2004).

L'Italia è da considerarsi a forte vocazione geotermica ma il suo potenziale può essere valorizzato molto più di quanto fatto finora; si tratta di risorse sostenibili, quasi sempre rinnovabili, compatibili con l'ambiente ed ora economicamente convenienti a tutti i livelli di temperatura. L'aumento della produzione di energia geotermica è dovuto soprattutto al maggior contributo degli usi diretti del calore, che sono cresciuti mediamente dell'8 % all'anno. Purtroppo, è da sottolineare che l'Italia, pur essendo la nazione geologicamente "più calda" d'Europa, figura solo al nono posto riguardo al diretto impiego del calore terrestre ed è ampiamente superata

anche da paesi "più freddi", come Svezia, Germania e Svizzera.

Mettendo insieme le caratteristiche geologiche del territorio italiano ed il tipo di risorse geotermiche disponibili, nonché il probabile aumento del prezzo dei combustibili fossili ed i miglioramenti tecnologici attesi, Cataldi *et al.* (2012) hanno previsto per il 2030: 1) un risparmio di petrolio equivalente pari a  $3\text{-}4 \cdot 10^6$  tonnellate/anno; 2) con gli usi diretti della geotermia tale risparmio avrà un'importanza economica simile a quella dell'energia geotermoelettrica; 3) una riduzione della  $\text{CO}_2$  emessa pari a  $10\text{-}13 \cdot 10^6$  tonnellate/anno; 4) uno sviluppo occupazionale (laureati, tecnici, operai) corrispondente a  $100\text{-}200 \cdot 10^3$  nuovi posti di lavoro.



Foto 13. A sinistra, pali energetici su cui sono già stati montati i collettori; a destra, pali energetici messi in posa (foto Rehau).

## Testi citati

- ARPAT (2014) - *Principali emergenze termali in Toscana: idrogeologia e chimica delle acque*. Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana, 378 pp.
- Banks D. (2012) - *An introduction to thermogeology: ground source heating and cooling*. Blackwell Publishing Ltd, Oxford (UK), 339 pp.
- Barazzuoli P., Costantini A., Grassi S., Lazzarotto A., Micheluccini M., Piantelli F., Salleolini M., Sandrelli F., Squarci P., Taffi L. & Veronesi G. (1988) - *L'energia geotermica in Provincia di Siena: studi e ricerche per l'individuazione e lo sfruttamento non elettrico dei fluidi a medio-bassa temperatura per il territorio comprendente i Comuni di Siena, Castelnuovo Berardenga, Asciano e Rapolano Terme*. Amministrazione Provinciale di Siena - Al.Sa.Ba. Grafiche, Siena, 201 pp.
- Barazzuoli P. & Salleolini M. (1993) - *L'acqua: risorsa, rischio e pianificazione*. In: "La storia naturale della Toscana meridionale", Pizzi Ed., Milano, 173-246.
- Barbagli A., Brogna F.N.A., Callegari I., Guastaldi E., Liati G., Marsico N., Rezza C. & Trotta M. (2013) - *Approccio multi-isotopico ed idrogeochimico per la caratterizzazione di acque termali: il caso di Saturnia (GR)*. Acque Sotterranee, 25-40.
- Battaglia A., Ceccarelli A., Ridolfi A., Frohlich K. & Panichi C. (1992) - *Radium isotopes in geothermal fluids in central Italy*. Proc. Int. Symp. on Isotope Techniques in Water Resources Development, I.A.E.A., 11-15 March 1991, Vienna, 363-383.
- Bencini A., Duchi V. & Martini M. (1977) - *Geochemistry of thermal springs of Tuscany (Italy)*. Chemical Geology, 19: 229-252.
- Bertani R. (2005) - *L'energia geotermica*. ANALYSIS, 3: 1-12.
- Bertani R. (2016) - *Geothermal power generation in the world 2010-2014 update report*. Geothermics, 60: 31-43.
- Boyle G. (2004) - *Renewable energy*. 2<sup>nd</sup> Edition, Oxford University Press, UK, 452 pp.
- Cataldi R., Grassi W. & Passaleva G. (2012) - *Stato attuale e previsioni di crescita della geotermia in Italia fino al 2030. Il nuovo manifesto della geotermia: una sfida da vincere*. Convegno CNR-SI-GEA-UGI, Roma, 8 giugno 2012, 22 pp.
- Chetoni R. (2000) - *Acque minerali e termali. Idrogeologia e opere di captazione. Gestione della risorsa idrica*. Edizioni Geo-Graph, Segrate (Milano), 890 pp.
- Conti P., Cei M. & Razzano F. (2016) - *Geothermal energy use, country update for Italy (2010-2015)*. European Geothermal Congress 2016, Strasbourg (France), 19-24 September 2016.
- Delmastro R. & Noce G. (2011) - *Manuale di geotermia a sonde verticali*. Hoepli, 520 pp.
- Dickson M.H. & Fanelli M. (2003) - *Geothermal background*. In: "Geothermal energy: utilization and technology", UNESCO, Paris (France), 1-25.
- Duchi V., Minissale A., Paolieri M., Prati F. & Valori A. (1992) - *Chemical relationship between discharging fluids in the Siena-Radicofani Graben and the deep fluids produced by the geothermal fields of Mt. Amiata, Torre Alfina and Latera (Central Italy)*. Geothermics, 21(3): 401-413.
- Fancelli R. & Nuti S. (1975) - *Studio sulle acque termali e minerali della parte orientale della Provincia di Siena*. Boll. Soc. Geol. It., 94 (1/2), 135-155.
- Fancelli M., Bellucci L. & Nachira F. (1982) - *Manifestazioni idrotermali italiane*. CNR-PFE, SPEG, RF 13, Roma.
- Fridleifsson I.B. (2001) - *Geothermal energy for the benefit of the people*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 5, 299-312.
- Fridleifsson I.B. (2003) - *Status of geothermal energy amongst the world's energy sources*. International Geothermal Association, IGA News, 52, 13-14.
- Gehlin S. (1998) - *Thermal Response Test, In-Situ Measurements of Thermal Properties in Hard Rock*. Licentiate Thesis, Luleå University of Technology, Department of Environmental Engineering, Division of Water Resources Engineering, Luleå (Sweden), 37 pp.
- Holm A., Blodgett L., Jennejohn D. & Gawell K. (2010) - *Geothermal Energy: International Market Update*. Geothermal Energy Association, 77 pp.
- IEA (2007) - *Renewables in Global Energy Supply*. International Energy Agency Fact Sheet, January 2007, Paris Cedex (France), 34 pp.
- IEA (2017) - *Key world energy statistics*. International Energy Agency, September 2017, Paris Cedex (France), 97 pp.
- Lund J.W. & Boyd T. (2016) - *Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review*. Geothermics, 60: 66-93.
- Minissale A., Magro G., Vaselli O., Verrucchi C. & Perticone I. (1997) - *Geochemistry of water and gas discharges from the Mt. Amiata silicic complex and surrounding areas (central Italy)*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 79: 223-251.
- Panichi C. (1982) - *Aspetti geochimici delle acque termali*. In: Il Graben di Siena, CNR-PFE, SPEG, RF 9, Pisa, 61-72.
- Pollack H.N., Hurter S.J. & Johnson J.R. (1993) - *Heat flow from the Earth's interior: analysis of the global data set*. Rev. Geophys., 31: 267-280.
- Rybach L. & Eugster W.J. (2002) - *Sustainability aspects of geothermal heat pumps*. Proc. 27<sup>th</sup> Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford (CA), 50-64.
- Tester J.W., Anderson B.J., Batchelor A.S., Blackwell D.D., DiPippo R., Drake E.M., Garnish J., Livesay B., Moore M.C., Nichols K., Petty S., Toksöz M.N. & Veatch R.W. (2006) - *The Future of Geothermal Energy - Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21<sup>st</sup> Century*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (MA), 372 pp.
- The KamLAND Collaboration (2011) - *Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements*. Nature Geoscience, 4: 647-651.
- Tinti F. (2008) - *Geotermia per la climatizzazione: applicazioni, tecnologia, analisi costi-benefici*. Dario Flaccovio Editore s.r.l., Palermo (seconda edizione 2009), 212 pp.
- Vaccaro M. (2012) - *Energia geotermica: impianti geotermoelettrici e usi diretti*. Camera di Commercio di Massa Carrara - EAMS, 2 febbraio 2012, 46 pp.